

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第1期

Vol.39 No.1

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2006~2015年北京市不同地区 O ₃ 浓度变化	王占山, 李云婷, 安欣欣, 李倩, 孙乃迪, 王步英, 潘锦秀 (1)
南京北郊黑碳气溶胶的来源解析	肖思略, 于兴娜, 朱彬, 何稼祺, 吕睿, 沙丹丹 (9)
电镀厂周边大气 PM ₁₀ 中重金属季节性分布特征及生态风险评价	赵珍丽, 赵委托, 黄庭, 程胜高, 余葱葱, 尹伊梦 (18)
广西玉林市大气 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 中有机碳和元素碳污染特征分析	黄炯丽, 陈志明, 莫招育, 李宏姣, 杨俊超, 刘慧琳, 毛敬英, 梁桂云, 张达标, 吴熊平, 郝爽 (27)
青岛近海及黄渤海大气气溶胶中不同形态氮磷质量浓度及组成特征	张瑞峰, 祁建华, 丁雪, 谢丹丹 (38)
大气环境分区管理: 以广东省为例	杨柳林, 李敏辉, 廖程浩, 曾武涛, 张晖, 张永波 (49)
基于高分影像的城市黑臭水体遥感识别: 以南京为例	温爽, 王桥, 李云梅, 朱利, 吕恒, 雷少华, 丁萧蕾, 苗松 (57)
基于 SWAT 模型的流域河道硝酸盐 δ ¹⁵ N 和 δ ¹⁸ O 模拟	王康, 冉宁, 林忠兵, 周祖昊 (68)
程海流域非点源污染负荷估算及其控制对策	陈学凯, 刘晓波, 彭文启, 董飞, 黄智华, 冯顺新, 王若男 (77)
陆浑水库饮用水源地水体中金属元素分布特征及健康风险评价	余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 谢地, 马鹏途 (89)
天津供水系统中抗生素分布变化特征与健康风险评价	张新波, 宋姿, 张丹, 刘楠楠, 李楠, 温海涛 (99)
西南丘陵区村镇典型供水水源有机物分布特征及对饮水水质的影响	王琼, 李乃稳, 李磊, 李龙国, 苟思, 杨凌肖 (109)
北京市地下水有机氯和有机磷农药健康风险评价	陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (117)
黄河岸边土壤中类二噁英类多氯联苯污染现状及风险	姚宏, 卢双, 张旭, 裴晋, 鲁垠涛 (123)
淹水落干下三峡水库消落带土壤无机磷形态转化特征	周健, 李春辉, 张志永, 胡红青, 万成炎, 胡莲, 潘晓洁 (130)
磷酸盐对铁锰复合氧化膜去除地表水中氨氮的影响	卓瑞双, 黄廷林, 张瑞峰, 文刚 (137)
K ₂ S ₂ O ₈ 强化 g-C ₃ N ₄ 薄膜电极光电催化降解 Cu(CN) ₂ ⁻ 并同步回收 Cu	党聪哲, 李一兵, 王彦斌, 赵旭 (145)
以 HKUST-1 为模板制备铜氧化物活化过一硫酸氢钾降解罗丹明 B	蒲嘉懿, 万金泉, 王艳, 马邕文, 武书彬 (152)
氨化松香基交联聚合树脂对水中诺氟沙星的吸附性能	马亚红, 黄婉婷, 刁开盛, 李鹏飞, 谭学才, 董慧岭, 覃方夸, 雷福厚, 刘绍刚 (161)
铁锰泥除砷颗粒吸附剂对 As(V) 的吸附去除	曾辉平, 吕赛赛, 杨航, 尹灿, 曹瑞华, 王艳菊, 李冬, 张杰 (170)
水铁矿及其胶体对砷的吸附与吸附形态	马玉玲, 马杰, 陈雅丽, 雷梅, 郭华明, 翁莉萍, 李永涛 (179)
阳(阴)离子复配修饰两性磁性膨润土的表面特征差异及对苯酚吸附的影响	任爽, 孟昭福, 王腾, 张洋, 田凯, 刘伟, 闫东旭 (187)
典型城市污水中对羟基苯甲酸酯的污染特征	赵雪, 张子峰, 祝富杰, 李一凡, 马万里 (195)
水力停留时间对活性炭生物转盘处理污水的影响	许雯佳, 成小英 (202)
环丙沙星对膜生物反应器运行效能的影响及其去除特性	戴琦, 刘锐, 舒小铭, 张永明, 陈吕军 (212)
AAO 工艺低氧条件下的运行及其模拟	曹特特, 王林, 李咏梅 (219)
磷酸盐对亚硝化系统的抑制及恢复	顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 张程锦 (227)
碳源对污水处理厂 SAD 工艺小试的影响	李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (232)
容积负荷对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷性能的影响	吕亮, 尤雯, 韦佳敏, 吴鹏, 沈耀良 (239)
DNBF-O ₃ -GAC 组合工艺深度脱除氮磷及代谢产物	钟丽燕, 郝瑞霞, 王卫东, 万京京, 朱晓霞 (247)
交替好氧/缺氧运行模式对生物脱氮效能及活性污泥胞外聚合物的影响	孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (256)
纳米零价铁对升流式颗粒污泥床反硝化性能的影响	周丰, 王翻翻, 钱飞跃, 黄慧敏, 沈耀良, 周建民 (263)
高含固污泥厌氧消化中 Fe/S 及 pH 对原位抑硫效率影响及其交互作用	韩芸, 曹玉芹, 卓杨, 王晓飞, 韩雅婷, 彭党聪 (269)
浑河流域贮存污泥成分特征及演变规律分析	刘甜甜, 崔崇威, 赫俊国, 唐建 (276)
去除城市生活污泥中有机络合态金属强化其厌氧生物制气	卢怡清, 许颖, 董滨, 戴晓虎 (284)
污泥飞灰中重金属不同浸出方法比较及综合毒性评价	王丰, 李润东, 李彦龙, 赵云斌, 杨天华 (292)
初冬时期闽江河口区养殖塘排水后的 CH ₄ 和 N ₂ O 通量日变化特征	杨平, 谭立山, 黄佳芳, 何清华, 全川 (300)
3 种土壤改良剂对河套灌区玉米田温室气体排放的影响	武岩, 红梅, 林立龙, 刘梅, 刘宇杰 (310)
有机氮替代比例对冬小麦/夏玉米轮作体系作物产量及 N ₂ O 排放的影响	侯苗苗, 吕凤莲, 张弘毅, 周应田, 路国艳, Ayaz Muhammad, 黎青慧, 杨学云, 张树兰 (321)
拔节期水稻光合碳输入的动态变化及其对施氮的响应: ¹³ C-CO ₂ 脉冲标记	陈珊, 祝贞科, 袁红朝, 王久荣, 彭佩钦, 葛体达, 吴金水 (331)
陕北黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤碳剖面分布特征	兰志龙, 赵英, 张建国, 李会杰, 司炳成, 焦瑞, Muhammad Numan Khan, Tanveer Ali Sial (339)
不同地表条件下生物炭对土壤氮挥发的影响	邹娟, 胡学玉, 张阳阳, 陈窃君, 王向前, 刘扬 (348)
秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响	徐国鑫, 王子芳, 高明, 田冬, 黄容, 刘江, 黎嘉成 (355)
县域尺度土壤铜的有效性及相关影响因素评估	李锦芬, 瞿明凯, 刘刚, 黄标 (363)
基于改进 LUR 模型的区域土壤重金属空间分布预测	曾菁菁, 沈春竹, 周生路, 陆春峰, 金志丰, 朱雁 (371)
沈北新区土壤中多环芳烃污染特征及源解析	李嘉康, 宋雪英, 魏建兵, 王颖怡, 李玉双, 郑学昊 (379)
磷酸盐、腐殖酸与粉煤灰联合钝化处理模拟铅镉污染土壤	赵庆圆, 李小明, 杨麒, 陈灿, 钟振宇, 钟宇, 陈飞, 陈寻峰, 王祥 (389)
控源及改良措施对稻田土壤和水稻镉累积的影响	封文利, 郭朝晖, 史磊, 肖细元, 韩晓晴, 冉洪珍, 薛清华 (399)
典型土壤双季稻对 Cd 吸收累积差异	李欣阳, 龙坚, 王树兵, 陈齐, 董霞, 蒋凯, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (406)
松花江上游夹皮沟金矿开采区芦苇叶片汞分布特征	张曼胤, 李梦洁, 崔丽娟, 王贺年, 郭子良, 徐卫刚, 魏圆云, 杨思, 肖红叶 (415)
硝酸盐对土壤反硝化活性及厌氧降解的影响	代军帅, 左小虎, 王明霞, 姚炎红, 周志峰 (422)
长期施肥对稻田土壤微生物量、群落结构和活性的影响	王伟华, 刘毅, 唐海明, 孙志龙, 李宝珍, 葛体达, 吴金水 (430)
海洋沉积物中硫酸盐还原菌和硫酸化菌群落分析方法的比较	张玉, 米铁柱, 甄毓, 陈烨, 付璐璐, 王勋功 (438)
鄱阳湖微囊藻毒素时空分布格局及其与理化及生物因子的关系	袁丽娟, 廖旦根, 张莉, 张大文, 罗林广, 刘聚涛 (450)
畜禽粪便中多重耐药细菌及耐药基因分布特征	张昊, 王盼亮, 杨清香, 俞宁 (460)
烟气净化工艺和焚烧炉类型对生活垃圾焚烧灰性质的影响	章骅, 于思源, 邵立明, 何品晶 (467)

程海流域非点源污染负荷估算及其控制对策

陈学凯^{1,3}, 刘晓波^{1,3*}, 彭文启^{1,3}, 董飞^{1,3}, 黄智华^{1,3}, 冯顺新^{1,3}, 王若男^{1,2,3}

(1. 中国水利水电科学研究院水环境研究所, 北京 100038; 2. 河海大学水文水资源学院, 南京 210098; 3. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 计算流域非点源氮磷污染负荷并以此开展源解析对于寻求水体污染控制最佳管理措施具有重要意义。通过对经典的Johnes输出系数模型进行改进, 考虑了降水、坡度以及污染源与水体之间距离等因素, 建立了一套在资料缺乏情况下, 适用于受地形、降水影响较大的高原湖泊地区的非点源污染负荷评估方法。选取云南省九大高原湖泊之一的程海作为研究对象, 验证了改进输出系数模型的合理性, 并对流域溶解态氮磷入湖污染负荷进行了全面的分析。结果表明: ①2014年, 程海流域溶解态氮磷入湖负荷分别是 $158.48 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $24.70 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 且二者空间分布相似; ②在土地利用方面, 农业用地对溶解态氮磷入湖污染负荷贡献最大, 分别是46.19%和48.16%; ③畜禽养殖和农村生活是溶解态氮磷入湖污染负荷治理的优先控制污染源, 南岸是溶解态氮磷入湖污染负荷重点治理区域; ④若实行农村生活和畜禽养殖、化肥流失及土地利用治理, 可使溶解态氮磷入湖污染负荷分别减少38.47%和40.76%。研究成果可为缺乏资料的高原湖泊地区非点源污染治理提供科学的理论依据。

关键词: 非点源污染; 程海流域; 氮; 磷; 输出系数模型

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)01-0077-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.201705061

Estimation of and Control Strategies for Pollution Loads from Non-point Sources in the Chenghai Watershed

CHEN Xue-kai^{1,3}, LIU Xiao-bo^{1,3*}, PENG Wen-qi^{1,3}, DONG Fei^{1,3}, HUANG Zhi-hua^{1,3}, FENG Shun-xin^{1,3}, WANG Ruo-nan^{1,2,3}

(1. Department of Water Environment, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: The calculation of non-point source (NPS) pollutant loads of nitrogen and phosphorus is the key step in preparing a pollution control plan. This study modified the export coefficient model by taking into account the precipitation, slope, distance between pollution sources and water bodies, and other relevant factors. The NPS pollution load assessment method established in this study can be applied to data-scarce basins and is suitable for plateau lake regions affected by terrain and precipitation. In this study, Chenghai Lake, which belongs to one of the nine major plateau lakes in Yunnan Province, is selected for the case study. This study first verifies the rationality of the improved export coefficient model based on actual observed values, and then utilizes the improved export coefficient model to assess the loads of dissolved nitrogen (DN) and dissolved phosphorus (DP) pollution. As indicated by the results, in 2014, the loads of DN and DP into Chenghai Lake are $158.48 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ and $24.70 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, respectively. The maximum contributions of DN and DP pollution load into Chenghai Lake are from agricultural cultivated land are 46.19% and 48.16%, respectively, in terms of land use. The results present a relatively consistent spatial distribution of DN and DP that indicates that the south bank is a key area for governance. Livestock and rural living are the main pollution sources influencing the load of DN and DP into Chenghai Lake and should be prioritized for control. If the pollution from rural living, livestock, fertilizer loss, and land use can be effectively controlled, the load of DN and DP into Chenghai Lake will be decreased by a maximum of 38.47% and 40.76%, respectively. The results of this study suggest that the improved export coefficient model can be applied for study of the NPS pollution assessment of plateau lake regions and can provide a theoretical basis for the NPS pollution control of the Chenghai Lake basin.

Key words: non-point source; Chenghai watershed; nitrogen; phosphorus; export coefficient model

近十年来,非点源污染尤其是农业非点源污染已经逐渐发展成为影响水环境质量乃至威胁人群健康的重要因素^[1~6],同时也是我国生态环境保护工作中的重点防控对象^[7]。非点源污染的模拟、评估以及管理历来是水污染防治领域的重要研究方向^[8,9],相关的方法和技术是我国流域水质目标管理技术体系中的关键环节^[10]。受流域监测资料缺

收稿日期: 2017-05-08; 修订日期: 2017-07-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51479219); 国家重点研发计划项目(2016YFC0401701); 流域水环境过程综合调控理论与应用项目(WE0145B532017); 水体污染控制与治理科技重大专项(2013ZX07501-004); 中国水利水电科学研究院“重大水利工程水生态安全保障及调控技术研究创新团队”项目

作者简介: 陈学凯(1990~),男,博士研究生,主要研究方向为水环境数值模拟和水污染控制等, E-mail: cxxkkaixuan@163.com

* 通信作者, E-mail: xbliliu@iwhr.com

乏的影响,在实际应用中,非点源污染负荷估算的经验模型往往比机理模型更具操作性和可行性^[11]. 英国学者 Johnes 等^[12]提出的输出系数模型,输入参数容易获取,且与实际监测结果有很好的吻合度,尤其是对资料缺乏地区进行非点源污染负荷估算时具有明显优势^[13],得到了广泛应用. 但由于该模型未考虑影响非点源污染的两个重要因素——降水和地形^[14],导致其在受降水、地形影响较大的区域表现出了一定的局限性. 因此,本文对该模型进行改进,并以程海为例开展模拟和校验.

程海是云南省第四大高原淡水湖泊,是著名的螺旋藻养殖基地之一,在区域生态环境保护和经济社会发展中作用突出. 近年来,程海出现了水位持续下降、湖区水量明显减少的严重问题,其对湖区水质影响突出. 流域的入湖污染负荷在该背景下如何控制,成为程海水环境保护的重要问题. 由于程海位于平均海拔大于1 500 m的高海拔地区和金沙江干热河谷区,流域气候炎热少雨,蒸发剧烈,水土流失严重,相比其他区域,非点源的产生输移更易受降水、地形影响,但流域监测数据的缺乏也使得入湖污染负荷的计算难度较大. 针对该问题,本文用改进后的输出系数模型对程海流域非点源溶解态氮磷入湖污染负荷进行估算,解析了影响流域溶解态氮磷入湖污染负荷的主要污染源,对比分析了不同污染防治措施产生的削减效果,以期为程海流域水污染防治提供有力的技术支撑.

1 研究区域概况

程海流域(100°38′~100°41′E,26°27′~26°28′N)位于云南省丽江市永胜县中部地区,为内陆湖泊. 流域总面积 318.3 km²,水位1 503 m时湖面面积76.38 km². 程海东、西、北三面环山,南面地势

平坦. 流域年平均气温 19.1℃,年平均降水量 725.5 mm,蒸发量2 269.4 mm. 程海流域涉及 9 个行政村,总人口约为 3.36 万人,从空间分布来看,星湖、季官、东湖、马军、河口位于流域南岸,兴仁、兴义位于流域北岸,海腰位于流域东岸,潘茆位于流域西岸. 程海流域地形情况、行政村、水位站以及子流域空间分布见图 1. 根据水系图和 DEM,结合野外调查,将程海流域划分为 29 个子流域.

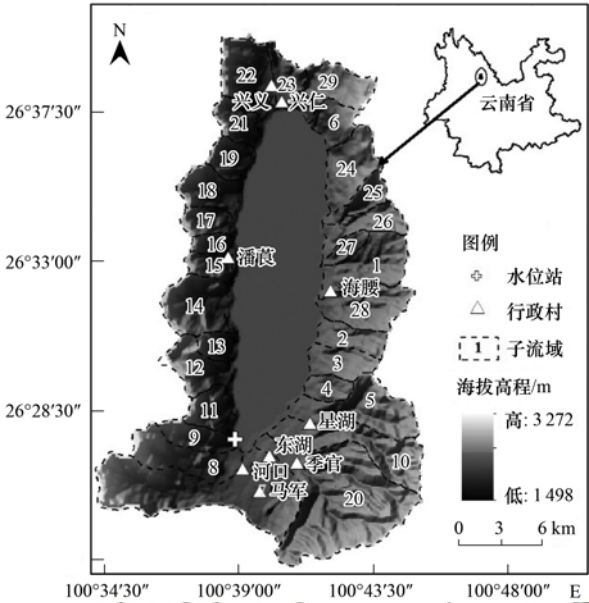


图1 程海流域地理位置和海拔高程空间分布示意
Fig. 1 Location and topographic characteristics of the Chenghai watershed in China

2 研究方法

2.1 数据来源

本研究使用的主要数据包括地形、土地利用、土壤、降水和社会经济统计数据(表 1),空间数据采用 ArcGIS 10.2 进行处理,统一使用双标准纬线等面积圆锥(Albers)投影,单位为 m.

表 1 研究数据需求及来源

Table 1 Datasets used in this study

数据类型	分辨率/比例/覆盖范围	用途	来源
土地利用	1:250 000	土地利用类型(2014 年)	landsat8 OLI 卫星遥感图像解译
气象数据	河口街水位站、丽江、永胜气象站月尺度降水数据	降水影响分析	中国气象科学数据共享服务网;丽江市水文水资源局
地形数据	30 m×30 m	地形影响分析	中国科学院地理与自然资源研究所;中国国家地理中心;地理空间数据云网站
社会经济数据	程海流域	农村生活、粪便污染以及畜禽养殖分析	丽江市永胜县统计年鉴

2.2 研究方法

降水和地形是非点源污染产生输移的重要影响因素,两者均对非点源污染起关键作用^[15,16]. 基于

经典的 Johnes 输出系数模型,参考以往的研究成果^[17,18],引入降水和坡度影响因子. 本研究以栅格为单元进行计算,其大小为 100 m×100 m,然后基

于子流域范围,统计各子流域的入湖污染负荷. 改进后的模型结构如下:

$$L = \sum_{i=1}^n \alpha \beta E_i [A_i(I_i)] + P \quad (1)$$

式中, L 为营养物质的流失量 ($\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$); α 为降水影响因子; β 为地形影响因子; E_i 为营养源 i 的输出系数 [$\text{kg} \cdot (\text{km}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 或 $\text{kg} \cdot (\text{头} \cdot \text{a})^{-1}$]; A_i 为第 i 类土地利用类型总面积 (km^2)、第 i 种牲畜的数量 (头) 或人口数量 (人); I_i 为第 i 种营养源的营养物质输入量 (kg); P 为由降雨输入的污染物总量 ($\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$), 由于缺乏相应的监测资料, 本研究暂未考虑湖面大气沉降带来的营养物流失量.

2.2.1 降雨影响因子 α

降雨强度主要对产量时间及养分浓度出现峰值的时间有一定的影响, 而降雨历时则会对污染物的流失量影响较大. 通过回归分析, 建立流域年平均降雨量 r 与溶解态污染物入湖量 L 的相关关系 $f(r)$. 从降雨的年际差异 α_t 和空间分布 α_s 两个角度来考虑降雨对溶解态污染物负荷的影响.

$$\alpha = \alpha_t \cdot \alpha_s = \frac{f(r)}{f(r_{\text{ave}})} \cdot \frac{r_j}{r_{\text{ave}}} \quad (2)$$

式中, r_{ave} 为流域多年平均降雨量; r_j 为空间单元 j 的年降雨量.

考虑到缺乏流域的污染物入湖量监测数据, 参考周玉良等^[19]和长江上游区域的研究成果, 建立程海流域年平均降雨量 r 与溶解态氮磷入湖污染负荷 L 的相关关系:

$$L_{\text{DN}} = 0.0003r^2 + 0.4587r - 334.21$$

$$(R^2 = 0.7125)$$

$$L_{\text{DP}} = 0.00007r^2 + 0.1721r - 117.91$$

$$(R^2 = 0.7113) \quad (3)$$

式中, L_{DN} 为溶解态氮 (DN) 年入湖量; L_{DP} 为溶解态磷 (DP) 年入湖量.

图2是程海流域1985~2016年逐年降水量变化曲线, 可以看出, 年降水量总体上呈现出下降趋势, 变化倾向率为 $-19.26 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$; 采用Mann-Kendall法对程海流域年降水量进行突变检验, 结果见图3. 可以看出, 两条统计曲线在2006年处存在交点, 说明程海流域的年降水量在2006年以后发生减少突变^[20,21]. 根据突变结果, 以2006~2016年为研究时段.

计算得到程海流域2006~2016年多年平均降雨量 r_{ave} 为702.47 mm, 将其代入式(3), 得到多年平均降雨条件下 DN 和 DP 的年入湖负荷, 加上对降雨

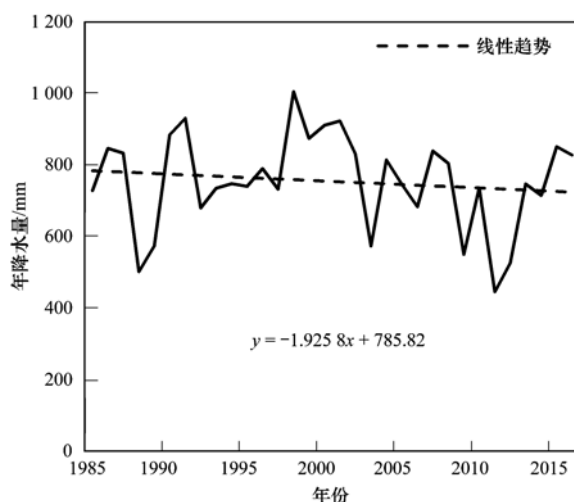


图2 流域年降水变化趋势

Fig. 2 Variation of annual precipitation

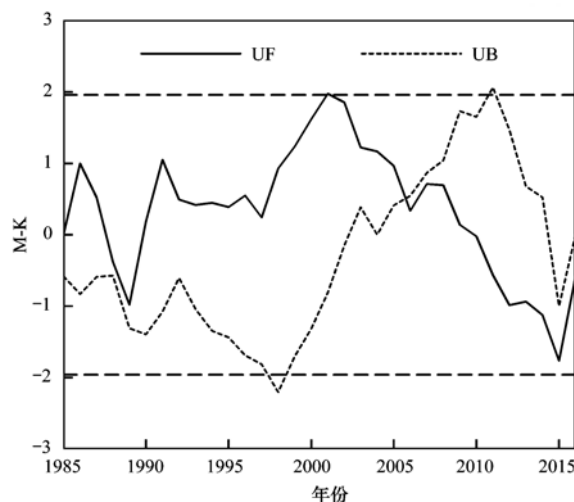


图3 流域年降水突变检验

Fig. 3 Mutation test of annual precipitation

空间分布的考虑, DN 和 DP 的降雨影响因子的表达式为:

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{DN}} &= \alpha_{\text{tDN}} \cdot \alpha_{\text{sDN}} \\ &= \frac{0.0003r^2 + 0.4587r - 334.21}{136.05} \cdot \frac{r_j}{r_{\text{ave}}} \\ \alpha_{\text{DP}} &= \alpha_{\text{tDP}} \cdot \alpha_{\text{sDP}} \\ &= \frac{0.00007r^2 + 0.1721r - 117.91}{37.53} \cdot \frac{r_j}{r_{\text{ave}}} \quad (4) \end{aligned}$$

式中, α_{DN} 为 DN 的降雨影响因子; α_{DP} 为 DP 的降雨影响因子.

通过计算, 程海流域2014年降水对 DN 的影响值为0.82~0.88, 对 DP 的影响值为0.79~0.90, 其空间分布整体呈现由西南向东北递减的趋势(图4).

2.2.2 地形影响因子 β

坡度是影响坡面产污的重要因素, 主要是通过

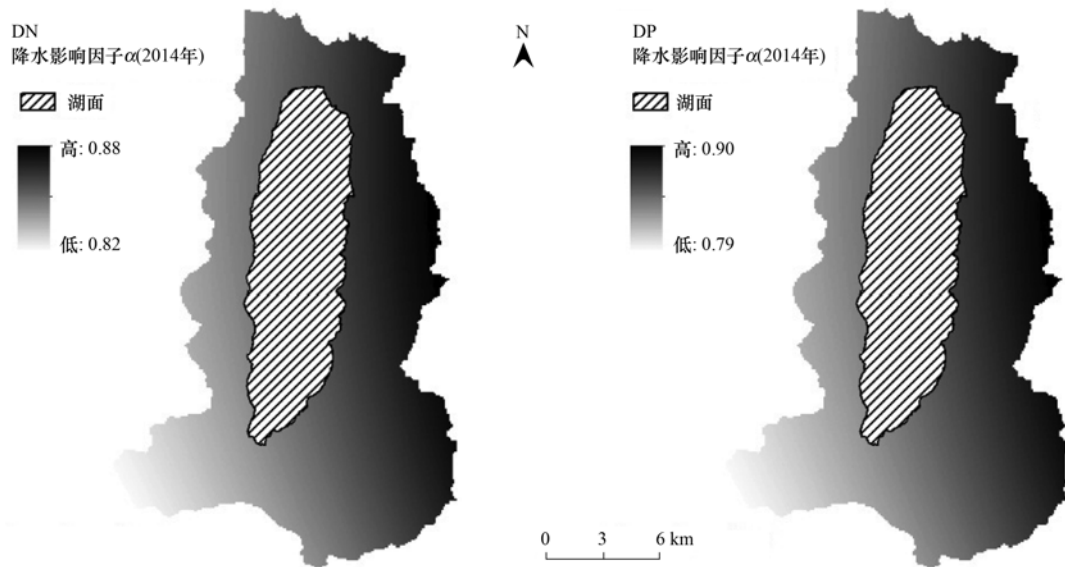


图4 程海流域降水影响因子空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of precipitation impact factor values

影响径流量的大小来决定 DN 和 DP 流失量. 相关研究证实, 径流量可表示为坡度的幂函数与常量的乘积^[22], 则坡度对 DN 和 DP 的影响可转化坡度与径流量的关系^[23]. 坡度影响因子 β 采用不同空间单元与流域均值的比值来反映不同区域因坡度不同造成的 DN 和 DP 的空间差异性. 坡度影响因子 β 的表达式为:

$$\beta = \frac{L(\theta_j)}{L(\theta_{ave})} = \frac{c \cdot \theta_j^d}{c \cdot \theta_{ave}^d} \quad (5)$$

式中, θ_j 为子流域 j 的坡度; θ_{ave} 为流域平均坡度; c , d 为常数.

根据张乃明等的研究成果^[24], c 为 0.188 1, d 为 0.610 4. 根据 DEM 数据, 得出程海流域的平均坡度 θ_{ave} 为 13.30°, 因此, DN 和 DP 的地形影响因子 β 为:

$$\beta = \frac{0.1881\theta^{0.6104}}{L(13.30)} = \frac{0.1881\theta^{0.6104}}{0.9128} = 0.2060\theta^{0.6104} \quad (6)$$

通过计算可以得到 DN 和 DP 的地形影响因子值从 0.00 ~ 2.34, 整体呈现西高东低的分布态势 (图 5), 这与程海流域西部地区坡陡谷深、东部地区坡度较缓以及南部地区地势平坦的地理分布特征相吻合.

2.2.3 参数确定

程海流域 DN 和 DP 的来源归纳起来主要包括农村生活、畜禽养殖、土地利用和水土流失中的溶解态部分这 4 种类型. 输出系数的确定一般有 3 种途径: 研究文献、实验结果和水文统计方法. 这 3 种方法各有优缺点, 但由于研究区域监测资料的短缺,

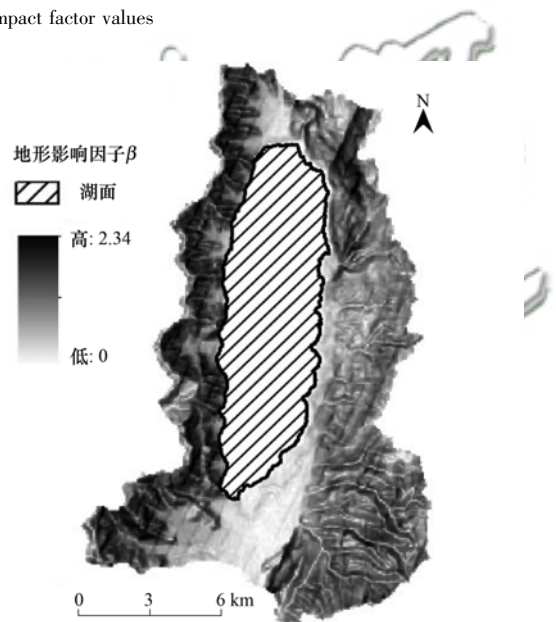


图5 程海流域地形影响因子空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of terrain impact factor values

本研究主要采用文献法结合调查数据来确定各污染源的输出系数. 鉴于程海流域无土地利用输出系数实验数据, 因此流域内各种土地利用类型的输出系数, 系参考长江上游地区以及西南地区的研究结果并取其平均值而确定, 结果见表 2.

综上所述, 通过文献阅读以及现场调研的方式确定本研究中各类型溶解态污染源的输出系数, 汇总其值见表 3.

2.2.4 入湖负荷估算

输出系数模型模拟出来的结果是溶解态污染物的产生量, 在集中收集和处理后形成溶解态污染物的排放量, 然后在降水冲刷和坡度作用下向河道输

表 2 不同文献中土地利用输出系数¹⁾

Table 2 Export coefficients of land use per year from the literatures

研究区域	污染物	输出系数值/ $t \cdot (km^2 \cdot a)^{-1}$					文献
		耕地	林地	草地	建设用地	未利用土地	
长江上游地区	DN	4.51	1.28	0.06	1.12	1.49	[25]
长江上游地区	DN	2.90	0.24	1.00	1.10	1.49	[26]
	DP	0.09	0.02	0.02	0.02	0.05	[26]
四川泸县	DN	2.90	0.36	0.60	1.12	1.49	[27]
	DP	0.60	0.06	0.20	0.02	0.05	[27]
云南滇池流域	DN	2.32	0.25	0.60	1.30	1.34	[28]
	DP	0.16	0.02	0.17	0.05	0.05	[28]
四川白鹿河流域	DN	2.88	0.36	0.60	1.33	1.15	[29]
	DP	0.59	0.06	0.12	0.28	1.06	[29]
四川芒溪河流域	DN	1.70	0.28	NA	NA	1.10	[30]
	DP	0.23	0.02	0.04	NA	NA	[31]
云南昆明云龙水库	DN	3.20	0.28	0.64	NA	NA	[31]
	DP	0.23	0.02	0.04	NA	NA	[31]
长江上游地区	DN	2.90	0.24	1.00	1.10	1.49	[32]
	DP	0.09	0.02	0.02	0.02	0.05	[32]
程海流域	DN	2.70	0.41	0.72	1.18	1.36	本研究
	DP	0.29	0.03	0.09	0.08	0.21	本研究

1) NA 为无数据

表 3 流域 DN 和 DP 污染源输出系数

Table 3 Export coefficients for the studied DN and DP pollutant sources

DP pollutant sources		DN	DP
污染源			
农村生活 ^[33] / $kg \cdot (人 \cdot a)^{-1}$	生活污水	0.22	0.03
	生活垃圾	0.64	0.26
	粪便排放	1.28	0.22
	大牲畜	6.68	0.55
畜禽养殖 ^[34] / $kg \cdot (头 \cdot a)^{-1}$	猪	0.80	0.20
	羊	1.13	0.40
	家禽	0.01	0.01
土地利用/ $t \cdot (km^2 \cdot a)^{-1}$	农业耕地	2.70	0.29
	林地	0.41	0.03
	草地	0.72	0.09
	建设用地	1.18	0.08
	裸地	1.36	0.21

移过程中,会受到植被拦截、地下渗漏、自然沉降以及各种生化作用的影响,导致产生的污染物不可能全部到达流域出口,因此需要引入入河系数 λ_r ,来表征污染物迁移过程中的衰减影响.但同时考虑到每个栅格所处的空间位置不同和到流域出口的距离和高差不同,溶解态污染物到达流域出口的衰减程度也会有所差异.所以,对于每个栅格单元の入湖系数值,可根据其到最近河道的距离与高程差对流域平均入湖系数值进行加权修正,来获取更为精确的污染物入湖量.溶解态污染负荷产生量和入

湖量之间存在如下的关系:

$$L_r = \lambda_r \cdot L \tag{7}$$

式中, L_r 为非点源溶解态污染物入湖量; λ_r 为非点源溶解态污染物入湖系数; L 为非点源溶解态污染物产生量.

根据程海生态环境保护总体实施方案,2014年程海流域生活污水、生活垃圾、粪便排放以及畜禽养殖的收集及安全处置率分别为20%、80%、45%、45%,考虑到排污渠道的类型以及当地气温等因素,马军、兴义村的平均入湖系数为0.9,其他行政村为1. DN和DP在土地利用的流域平均入湖系数参考已有的研究成果,分别为0.3和0.2^[35].

2.2.5 模型验证

参考当地环保部门的相关资料,以2009、2012以及2014年DN和DP入湖负荷数据来评价模型的合理性.图6是模拟值与实际值的对比分析.可以看出,DN的模拟值与实际值吻合较好,相对误差均在10%以内,说明构建的DN输出系数模型基本合理.相比之下,DP的相对误差较大,其相对误差在-30%左右.但由于DP入湖负荷相对较小,所以在数值上相差不大.出现这种现象的原因有两方面,一方面是模型的改进对DN的灵敏度较高;另一方面是由于非点源磷污染主要以颗粒态存在,模型对DP部分的估算有一定的局限性.

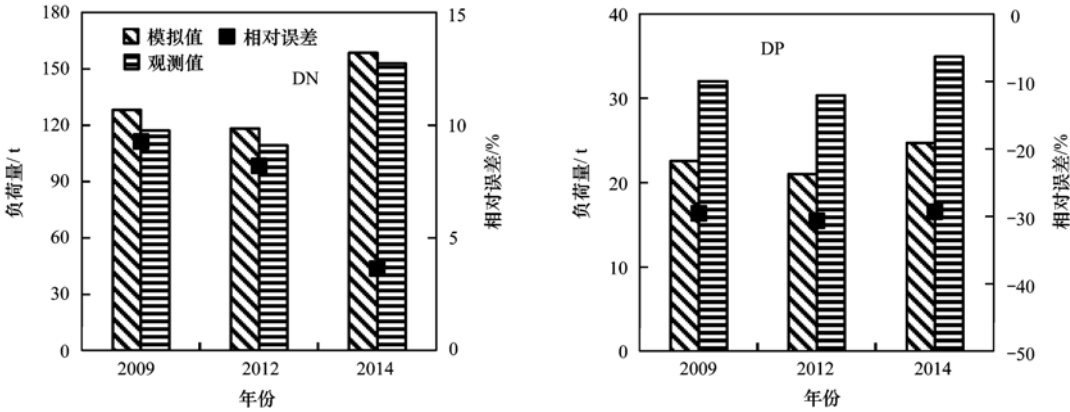


图 6 程海流域模拟值与实际观测值比较

Fig. 6 Comparison of simulated and measured values in the Chenghai watershed

3 结果与分析

3.1 土地利用

利用改进的输出系数模型,计算不同土地利用类型的 DN 和 DP 入湖污染负荷及负荷强度,统计结果见表 4. 可以看出,不同土地利用类型下的入湖污染负荷及负荷强度有较大的差异. 在 DN 和 DP 入湖污染负荷方面,农业耕地(旱地、水田以及园地)最大,其次为林地(有林地、灌木林地以及其他林地)、草地;在 DN 和 DP 入湖污染负荷强度方面,农业耕地最大,其次为裸地、草地. 具体从 DN 来看,平均入湖污染负荷为 $5.84 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$,其中农业耕地中的旱地入湖污染负荷贡献最大,为 $17.63 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$,占总负荷的 30.19%,其次为草地、有林地,分别为

10.21 、 $10.17 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$,贡献比例分别为 17.49% 和 17.42%,水田的入湖污染负荷也高于流域平均值,为 $7.87 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$,贡献比例为 13.49%; DN 平均入湖负荷强度为 $0.28 \text{ t}\cdot(\text{km}^2\cdot\text{a})^{-1}$,园地、旱地、水田以及裸地的入湖负荷强度均高于流域平均值. DP 情况整体与此类似,但也略有不同. DP 平均入湖污染负荷为 $0.61 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$,其中旱地仍居首位,为 $1.92 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$,贡献比达 31.49%,其次为草地、水田,分别为 1.31 、 $0.85 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$,贡献比例为 21.53% 和 14.06%,有林地的入湖污染负荷也高于流域平均值,为 $0.75 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$,贡献比例为 12.41%; DP 平均入湖污染负荷强度为 $0.03 \text{ t}\cdot(\text{km}^2\cdot\text{a})^{-1}$,园地、旱地、裸地以及水田的入湖污染负荷强度相对较大,均超过了流域平均值.

表 4 程海流域不同土地利用类型 DN 和 DP 入湖负荷

Table 4 Pollution load of DN and DP into Chenghai Lake from land-use

土地利用类型	面积 /km ²	面积百分比 /%	DN			DP		
			负荷强度 /t·(km ² ·a) ⁻¹	负荷量 /t·a ⁻¹	负荷百分比 /%	负荷强度 /t·(km ² ·a) ⁻¹	负荷量 /t·a ⁻¹	负荷百分比 /%
草地	47.22	14.83	0.22	10.21	17.49	0.03	1.31	21.53
灌木林地	36.10	11.34	0.13	4.79	8.20	0.01	0.36	5.87
旱地	28.32	8.90	0.62	17.63	30.19	0.07	1.92	31.49
建设用地	7.11	2.23	0.17	1.17	2.01	0.01	0.08	1.33
裸地	11.24	3.53	0.30	3.34	5.72	0.05	0.52	8.58
水田	20.03	6.29	0.39	7.87	13.49	0.04	0.85	14.06
有林地	77.54	24.36	0.13	10.17	17.42	0.01	0.75	12.41
其他林地	12.40	3.90	0.14	1.73	2.97	0.01	0.13	2.10
园地	2.21	0.69	0.66	1.46	2.51	0.07	0.16	2.61
水域	76.14	23.92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

从空间分布看,土地利用产生的 DN 和 DP 入湖污染负荷主要集中在流域的南岸和北岸,其他依次为东岸和西岸(图 7). 南、北岸属于农业化程度较高的区域,其农业用地分别占流域农业用地总面积的 54.87% 和 19.37%,这势必会造成较多的农田化

肥流失和农田固废污染现象的发生;而东、西岸的土地利用多以林地、草地为主,其入湖污染负荷相对较低.

3.2 农村生活和畜禽养殖

利用上述确定的农村生活和畜禽养殖营养源输

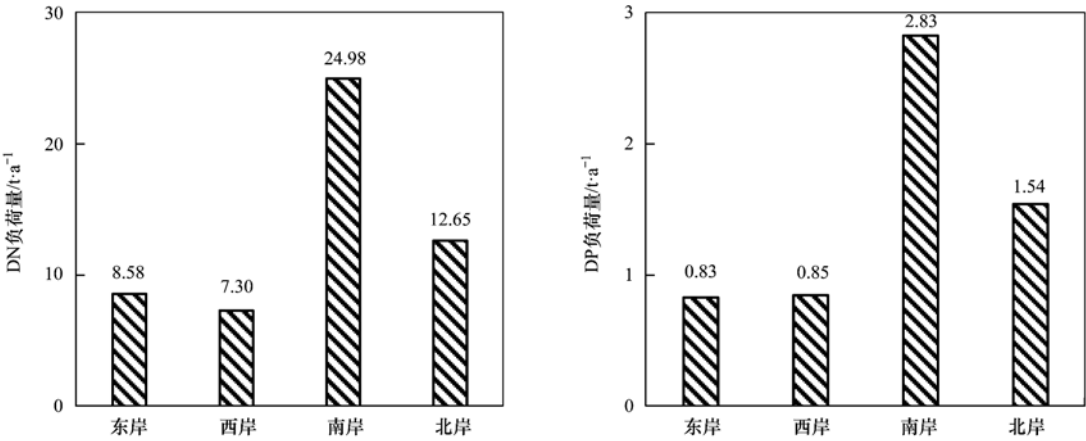


图 7 流域不同区域土地利用溶解态氮磷污染入湖负荷量

Fig. 7 Pollution load of DN and DP into Chenghai Lake from land-use in different regions

出参数,分别评估农村生活和畜禽养殖产生的 DN 和 DP 入湖污染负荷,结果见图 8. 可以得到,农村生活污染产生的 DN 和 DP 入湖污染负荷分别为 $32.61\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $5.49\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$, 畜禽养殖产生的 DN 和 DP 入湖污染负荷分别为 $52.58\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $8.11\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$. 具体来看,对农村生活 DN 和 DP 入湖污染负荷贡献最大的是居民粪便排放,累计贡献率为 130.18%; 其他依次为生活垃圾、生活污水,累计贡献率分别

为 38.50% 和 31.32%. 从空间分布来看,农村生活和畜禽养殖产生的 DN 和 DP 入湖污染负荷主要集中在南岸和北岸. 主要原因是南、北岸分别承担着流域 56.70% 和 22.63% 的人口负荷以及流域 56.40% 和 21.34% 的畜禽养殖量,造成了较高的生活污水、垃圾以及畜禽粪便排放量. 相比之下,流域东、西岸由于在人口、畜禽养殖量方面占有比例偏小,其入湖污染负荷也相对较低.

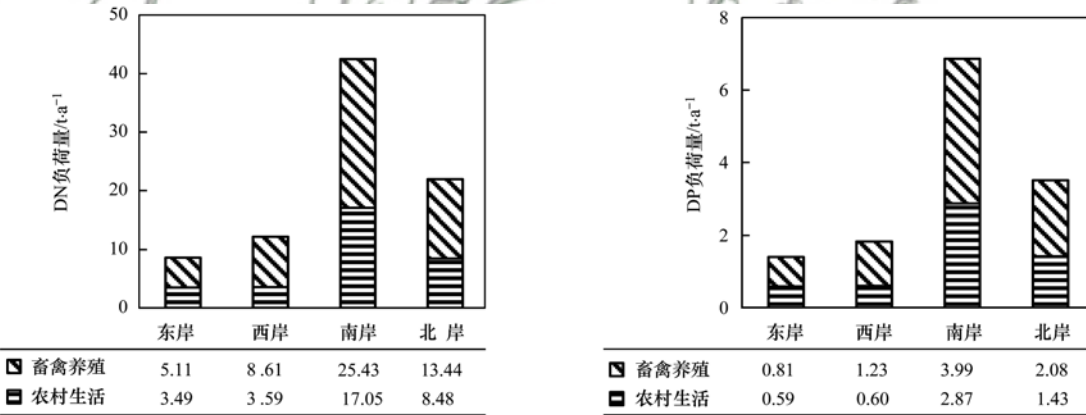


图 8 畜禽养殖和农村生活 DN 和 DP 入湖负荷

Fig. 8 Pollution load of DN and DP into Chenghai Lake from livestock and rural living

3.3 空间分布特征

基于 GIS 的空间分析和统计模块,得到流域内 DN 和 DP 的入湖负荷量空间分布及贡献率,结果见图 9 和表 5. 从空间分布角度看,各子流域 DN 入湖污染负荷在 $1.03\sim19.23\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ 之间波动,平均值为 $5.48\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$,总入湖污染负荷为 $158.47\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$,南岸的 DN 入湖污染负荷最大,为 $78.46\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$,贡献比例为 49.51%,其中南岸的 7、20 号子流域入湖污染负荷较大,分别为 $18.42\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $19.23\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$,占到了总入湖污染负荷的 11.55% 和 12.06%; DP 的空间分布与此类似,各子流域的入湖污染负荷在 $0.15\sim$

表 5 不同区域 DN 和 DP 入湖污染负荷及贡献率

Table 5 Loads and contribution ratios of DN and DP in different regions

区域	DN		DP	
	入湖污染负荷 / $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$	贡献率 /%	入湖污染负荷 / $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$	贡献率 /%
南岸	78.46	49.51	12.39	50.16
北岸	37.08	23.40	5.93	24.01
东岸	21.60	13.63	3.22	13.04
西岸	21.33	13.46	3.16	12.79

$2.90\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ 之间波动,平均值为 $0.86\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$,总入湖污染负荷为 $24.70\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$,南岸的 DP 入湖污染负荷

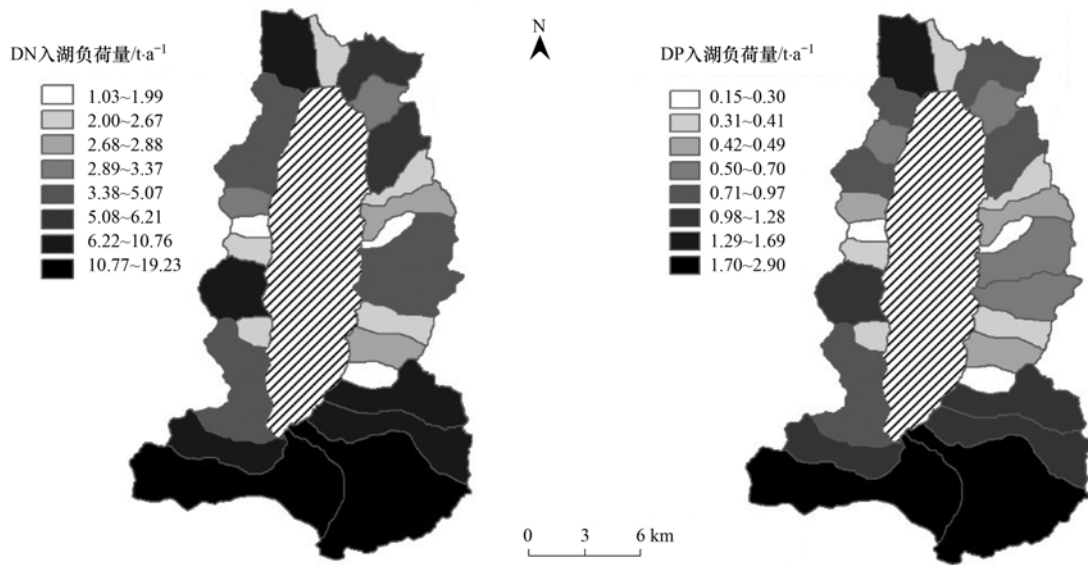


图9 DN和DP入湖污染负荷空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of DN and DP pollution load into Chenghai Lake

仍居首位,为 $12.39 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 贡献比例高达 50.16%, 其中南岸的 7、20 号子流域入湖污染负荷较大, 分别为 $2.9 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $2.85 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 占总入湖污染负荷的 11.74% 和 11.54%。很明显可以看出,南岸是 DN 和 DP 入湖污染负荷的重点治理区域。

4 讨论

4.1 流域氮磷污染负荷污染源解析

综合考虑农村生活、畜禽养殖、土地利用以及水土流失带来的 DN 和 DP 入湖污染负荷,可以得到, DN 入湖污染负荷约为 $158.48 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, DP 入湖污染负荷约为 $24.70 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。为进一步分析 DN 和 DP 的来源,把土地利用分为农业用地和其他土地利用两个部分,其中农业用地包括水田、旱地和园地,其污染物来源于农田化肥流失以及农田固废污染,分析结果见图 10。可以看出,对 DN 贡献较大的污染源为畜禽养殖,其贡献比例为 33.18%; 其次为农村生活,贡献比例为 20.58%,其他土地利用、农业用地的贡献比例分别为 18.98%、17.22%; 水土流失对 DN 的入湖污染负荷相对较小,为 10.05%。在 DP 方面,畜禽养殖的贡献比例依然最大,为 32.85%; 其次为农村生活,贡献比例分别为 22.21%; 由于磷污染多以流失土粒为载体进入水体中,导致其在土壤侵蚀过程中携带的 DP 入湖污染负荷也相应增加,其贡献比例为 20.32%; 在土地利用方面,其他土地利用和农业用地贡献比例分别为 12.61% 和 12.00%。

综合对比 DN 和 DP 的污染来源及贡献比例,可

以看出,畜禽养殖和农村生活是影响 DN 和 DP 入湖污染负荷的主要来源,累计贡献率分别为 66.03% 和 42.79%,属于优先控制污染源。

由于流域内“一池三改”工程还未完工,导致很多区域粪尿等排泄物经降水冲刷作用下直接排入湖中,造成畜禽养殖成为 DN 和 DP 入湖污染负荷的一个重要来源。农业用地和其他土地利用对 DN 和 DP 的入湖污染负荷贡献比例相当,但农业用地和其他土地利用面积分别占全流域的 15.96% 和 60.22%,很明显,农业用地产生的 DN 和 DP 入湖污染负荷强度要远高于其他土地利用。出现这样现象的原因有两点,一是溶解态污染物质主要通过地表径流进行输移,而草地、林地等土地利用的植被覆盖对雨水冲刷、地表径流的形成具有一定的减缓和滞留作用,而农业用地由于翻耕播种、肥料施用,造成氮磷营养物质输出较大。二是程海流域单位面积化肥施用量较大,据统计,流域内农业用地平均施肥量达 $156.30 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$,氮肥施用量为 $60.02 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$,磷肥可达到 $75.04 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$,远高于全国平均值。从种植结构看,流域内以种植水稻、玉米为主,大蒜种植也是程海镇的主要产业之一,其施肥量较水稻高出一倍以上,而目前国内农业生产中氮肥的平均利用率为 30%~35%,磷肥为 10%~20%^[36],尤其是水稻对化肥的有效利用率低,加之氮磷肥的使用不当会导致严重的化肥流失现象发生,造成流域内农业用地的氮磷污染负荷普遍偏高。此外,有 37.3% 的旱地分布在大于 15° 的坡度区域,加剧了氮磷营养物质的流失。同时,程海所在的永胜县是云南省水土

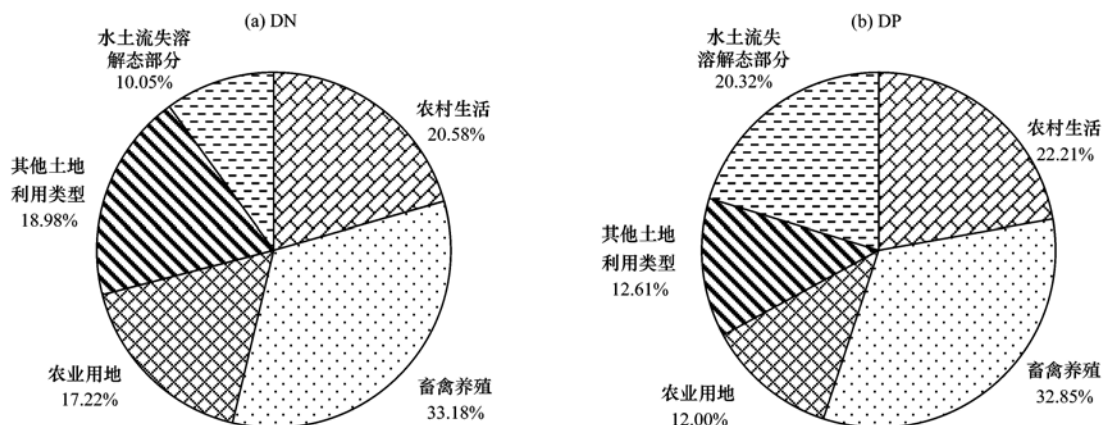


图 10 程海流域 DN 和 DP 入湖污染负荷源贡献率

Fig. 10 Source contribution ratios of DN and DP pollution load into Chenghai Lake

流失严重地区,程海流域则是重中之重.轻度以上水土流失面积达 150.1 km^2 ,占陆地面积的 61.59%.在降雨期土壤中的污染物质尤其是 TP 中溶解于水的部分直接冲刷进入水体,这一现象也应引起注意.

4.2 流域非点源污染控制方案分析

根据上述的分析结果,造成流域内 DN 和 DP 入湖污染负荷偏高的原因主要体现在以下 3 个方面:农村生活污水和粪便集中收集处理率低;农业生产以水肥高投入作物为主且大多以斜坡耕作;植被覆盖度欠佳,水土流失问题严重,缺乏有效的工程措施.

以流域土地利用现状为基础,根据土地利用开发强度、生态适宜性和脆弱性状况以及地形、村落人口分布情况,按照“控制-修复-保护”的原则,参考文献[37]及相关资料,将程海流域综合划分为保护区、控制区和修复区.保护区为湖泊保育区,控制区以湖滨缓冲区分外至山脚之间的坝区为主,山区为修复区.空间分布见图 11.

具体来看,建立保护区,其目的是为了构筑流域生态安全的基本格局,划分依据是文献[37]的一级保护区范围,即程海水体及最高运行水位 1501 m 水位线外延水平距离 100 m 内,面积为 80.56 km^2 ,占流域面积的 25.31%.其中陆地面积为 4.76 km^2 ,水面面积为 75.80 km^2 ,主要包括水体和湖滨带.控制区是溶解态污染物治理的重点区域,是居民用地和农业用地相对集中的区域,涉及国土面积为 80.59 km^2 ,占流域面积的 25.32%.修复区为控制区以外的区域,是流域水土流失治理的重点区域,其目的是为了强化流域非点源防治的安全屏障.涉及的国土面积为 161.92 km^2 ,占流域面积的 50.91%.

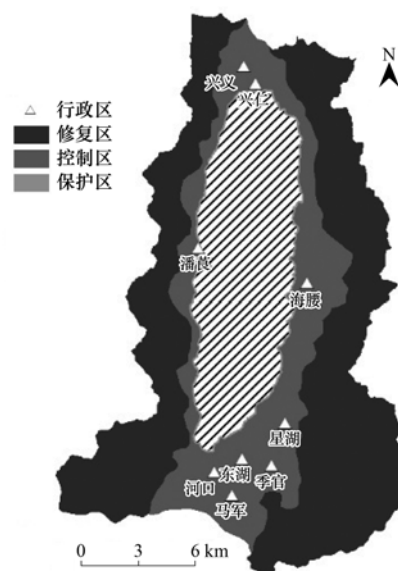


图 11 程海流域非点源污染防控分区

Fig. 11 Non-point source pollution prevention and control zones in the Chenghai watershed

根据分区结果,结合不同区域的污染源特征提出不同的治理措施,进行治理效果对比分析,用以探求治理措施的合理性.综合来看,流域 DN 和 DP 入湖污染负荷治理措施可归纳为土地利用与农田化肥流失治理、畜禽养殖和农村生活污染治理.

农村生活和畜禽养殖污染治理.以流域内 2014 年末人口量为基准年,人口增长率参照近 5 年的年平均人口增长率来确定,为 2.79‰,在现状发展条件下,到 2020 年总人口为 34 170 人,比 2014 年人口增长 567 人.就目前来看,通过政府专项资金和企业自筹等方式,程海流域已经全面推进截污沟渠入户工程和“一池三改”沼气池建设与改造工程,有利地保障了流域内农村生活和畜禽养殖污染治理方案的实施.结合流域未来发展规划,对农村生活和畜

禽养殖污染治理有以下两种方案. 方案一: 削减 10% 的畜禽养殖量; 粪便处理率提高到 40%, 生活污水处理率提高到 60%, 生活垃圾处理率维持现状. 方案二: 削减 20% 的畜禽养殖量; 粪便处理率提高到 60%, 生活污水处理率提高到 75%, 生活垃圾处理率提高到 85%.

土地利用与农田化肥流失治理. 农田化肥流失治理主要考虑旱地、水田以及园地的溶解态污染物. 有研究表明, 削减 30% 的化肥施用量, 不会对农田产量造成减产影响^[38]; 此外, 流域内种植水稻水肥需求量大, 产值仅约每亩 1 000 元, 且程海水位逐年下降, 灌溉用水不足, 目前, 程海流域正逐步压缩水肥高投入作物的种植面积, 发展芒果、石榴、葡萄等经济作物, 预计可使农民经济收入由原来的每亩 1 000 元左右提高到每亩 5 000 ~ 10 000 元以上. 从减少农田土地利用类型的输出系数角度着手设置治理方案, 即从“源”的角度进行防控^[39]. 方案一: 农业用地施肥量削减 15%; 保护区内的土地利用均改为有林地; 控制区和修复区内的裸地、荒地改为有林地. 方案二: 农业用地施肥量削减 30%; 保护区内的土地利用均改为有林地; 控制区和修复区内的裸地、荒地改为有林地; 修复区内退耕还林, 草地改为高密度草地.

设置情景有畜禽养殖和农村生活污染治理(现状、方案一、方案二), 土地利用与农田化肥流失治理(现状、方案一、方案二), 根据其相互组合, 按代表性和实施的难易程度, 选取 6 种情景进行分析, 模拟治理情景前后 DN 和 DP 的入湖污染负荷, 情景方案设置见表 6.

各典型情景下 DN 和 DP 入湖污染负荷削减情况见图 12. 可以看出, 情景 6 削减效果最显著, 在畜禽养殖和农村生活污染、土地利用与农田化肥流失

均实行方案二时, DN 和 DP 入湖污染负荷分别减少 38. 47% 和 40. 76%. 其中保护区的 DN 和 DP 入湖污染负荷分别减少 56. 29% 和 52. 79%; 控制区 DN 和 DP 入湖污染负荷分别减少 32. 94% 和 36. 63%; 控制区 DN 和 DP 入湖污染负荷分别减少 40. 84% 和 42. 51%.

表 6 典型情景设置

Table 6 Typical scenario sets

情景	畜禽养殖和农村生活污染治理	土地利用与农田化肥流失治理
0	现状	现状
1	方案一	现状
2	方案二	现状
3	现状	方案一
4	现状	方案二
5	方案二	方案一
6	方案二	方案二

具体来看, 若只进行畜禽养殖和农村生活污染治理可使 DN 和 DP 入湖污染负荷分别减少 25. 46% 和 30. 37% (情景 2); 若只进行土地利用与农田化肥流失治理(情景 4), DN 和 DP 入湖污染负荷分别减少 12. 50% 和 10. 39%. 相比来看, 畜禽养殖和农村生活污染治理效果要好于土地利用与农田化肥流失治理效果. 虽然土地利用污染贡献比例较大, 但由于流域内土地利用类型分布较多, 只有大约 50% 的土地利用污染来源于农业用地, 其余来源于分布在人烟稀少地区的林地、草地等土地利用类型, 加之流域内坡陡流急, 土壤氮、磷本底值较高, 因此从治理的难易角度来看, 对土地利用类型进行全面治理存在一定的难度. 流域内畜禽养殖和农村生活污染治理水平相对较低, 尤其是畜禽养殖污染在入湖污染负荷中占有较大的比重, 目前, 相应的污水和粪便集中处理配套工程也在修建, 很明显, 畜禽养殖和农村生活污染治理最易实施, 且削减效果比

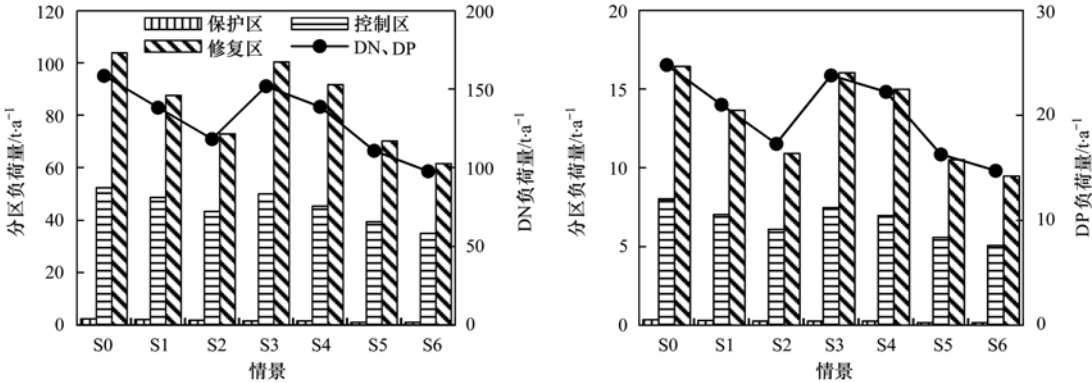


图 12 不同情景下 DN 和 DP 入湖污染负荷比较

Fig. 12 Comparison of the loads of DN and DP in different scenarios

较明显。但是,土地利用和化肥流失治理是从“源”的角度出发,畜禽养殖和农村生活污染治理是从“汇”的角度出发,因此需要两者并重,在提高污水、垃圾以及粪便处理率的时候,也需要加大科学施肥力度,提高流域植被覆盖度。

5 结论

(1)2014 年程海流域 DN 和 DP 入湖污染负荷分别为 $158.48 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $24.70 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

(2)在土地利用方面,农业用地对 DN 和 DP 入湖污染负荷贡献率最大,分别为 46.19% 和 48.16%。通过污染源解析,畜禽养殖和农村生活是影响 DN 和 DP 入湖污染负荷的重要因素,属于优先控制污染源。

(3)DN 和 DP 入湖污染负荷空间分布差异较大。南岸是 DN 和 DP 入湖污染负荷的高值区,分别占总入湖污染负荷的 49.51% 和 50.16%,属重点治理区域。

(4)通过情景分析,若削减 20% 的畜禽养殖量,粪便、污水、垃圾的处理率分别提高到 60%、75% 和 85%,农业用地施肥量削减 30%,保护区内土地利用均改为有林地,控制区和修复区内的荒地改为有林地,修复区内退耕还林,草地改为高密度草地。可使 DN 和 DP 入湖污染负荷分别减少 38.47% 和 40.76%。

(5)程海流域水文、水质监测数据较为缺乏,对入湖水量、污染物量计算的准确性造成明显影响,定期开展入湖河流的水量、水质监测,并结合监测数据进一步完善模型应是下一步研究工作的重点。

参考文献:

- [1] Ou Y, Wang X Y. Identification of critical source areas for non-point source pollution in Miyun reservoir watershed near Beijing, China[J]. *Water Science & Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 2008, **58**(11): 2235-2241.
- [2] Dowd B M, Press D, Huertos M L. Agricultural nonpoint source water pollution policy: the case of California's central coast[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2008, **128**(3): 151-161.
- [3] Vagstad N, French H K, Andersen H E, *et al.* Comparative study of model prediction of diffuse nutrient losses in response to changes in agricultural practices[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2009, **11**(3): 594-601.
- [4] Brown T C, Froemke P. Nationwide assessment of nonpoint source threats to water quality[J]. *Bioscience*, 2012, **62**(2): 136-146.
- [5] Liu X, Li D L, Zhang H B, *et al.* Research on nonpoint source pollution assessment method in data sparse regions: a case study of Xichong river basin, China[J]. *Advances in Meteorology*, 2015, **2015**: 519671.
- [6] 金相灿. 湖泊富营养化控制和管理技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- [7] 国务院. 国务院关于印发“十三五”生态环境保护规划的通知[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-12/05/content_5143290.htm, 2016-12-05.
- [8] Zhang M H, Xu J M. Nonpoint source pollution, environmental quality, and ecosystem health in China: introduction to the special section[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2011, **40**(6): 1685-1694.
- [9] Cordeiro M R C, Ranjan R S, Cicek N. Assessment of potential nutrient build-up around beef cattle production areas using electromagnetic induction[J]. *Environmental Technology*, 2011, **33**(15): 1825-1833.
- [10] Yang Y H, Yan B X, Shen W B. Assessment of point and nonpoint sources pollution in Songhua river basin, Northeast China by using revised water quality model [J]. *Chinese Geographical Science*, 2010, **20**(1): 30-36.
- [11] Singh J, Knapp H V, Arnold J G, *et al.* Hydrological modeling of the Iroquois river watershed using HSPF and SWAT [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2005, **41**(2): 343-360.
- [12] Johnes P J. Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters: the export coefficient modelling approach[J]. *Journal of Hydrology*, 1996, **183**(3-4): 323-349.
- [13] Ierodiaconou D, Laurenson L, Leblanc M, *et al.* The consequences of land use change on nutrient exports: a regional scale assessment in South-West Victoria, Australia[J]. *Journal of Environmental Management*, 2005, **74**(4): 305-316.
- [14] Noto L V, Ivanov V Y, Bras R L, *et al.* Effects of initialization on response of a fully-distributed hydrologic model[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, **352**(1-2): 107-125.
- [15] Li Y, Wang C, Tang H L. Research advances in nutrient runoff on sloping land in watersheds[J]. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 2006, **9**(1): 27-32.
- [16] Yang G X, Best E P H, Whiteaker T, *et al.* A screening-level modeling approach to estimate nitrogen loading and standard exceedance risk, with application to the Tippecanoe river watershed, Indiana[J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, **135**: 1-10.
- [17] Shen Z Y, Chen L, Ding X W, *et al.* Long-term variation (1960-2003) and causal factors of non-point-source nitrogen and phosphorus in the upper reach of the Yangtze river[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, **252-253**: 45-56.
- [18] Ding X W, Shen Z Y, Hong Q, *et al.* Development and test of the export coefficient model in the upper reach of the Yangtze river[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, **383**(3-4): 233-244.
- [19] 周玉良, 刘丽, 金菊良, 等. 基于 SCS 和 USLE 的程海总磷总氮参照状态推断[J]. *地理科学*, 2012, **32**(6): 725-730.
- [20] Zhou Y L, Liu L, Jin J L, *et al.* Inference of reference conditions for total phosphorus and total nitrogen based on SCS and USLE model in Chenghailake [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, **32**(6): 725-730.
- [20] 王理萍, 王树仿, 张刘东, 等. 1960~2013 年云南省降水时空变化特征分析[J]. *水电能源科学*, 2016, **34**(12): 20-24.

- Wang L P, Wang S F, Zhang L D, *et al.* Spatial-temporal characteristics of precipitation in Yunnan province from 1960 to 2013[J]. *Water Resources and Power*, 2016, **34**(12): 20-24.
- [21] 徐巧芝, 郭汝军, 丁文荣. 滇中地区降水特征与变化趋势研究[J]. *水土保持研究*, 2013, **20**(5): 155-159.
- Xu Q Z, Guo R J, Ding W R. Characteristics and changing trends of precipitation in the center of Yunnan province, China [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, **20**(5): 155-159.
- [22] Liu Q Q, Singh V P. Effect of microtopography, slope length and gradient, and vegetative cover on overland flow through simulation[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2004, **9**(5): 375-382.
- [23] Aschmann S G, Anderson D P, Croft R J, *et al.* Using a watershed nutrient dynamics model, WEND, to address watershed - scale nutrient management challenges[J]. *Journal of Soil & Water Conservation*, 1999, **54**(4): 630-635.
- [24] 张乃明, 余扬, 洪波, 等. 滇池流域农田土壤径流磷污染负荷影响因素[J]. *环境科学*, 2003, **24**(3): 155-157.
- Zhang N M, Yu Y, Hong B, *et al.* Factors influencing phosphorus loss by runoff process from farmlands in the Dianchi watershed[J]. *Environmental Science*, 2003, **24**(3): 155-157.
- [25] 丁晓雯, 沈珍瑶, 刘瑞民. 长江上游非点源氮素负荷时空变化特征研究[J]. *农业环境科学学报*, 2007, **26**(3): 836-841.
- Ding X W, Shen Z Y, Liu R M. Temporal-spatial changes of non-point source nitrogen in upper reach of Yangtze river basin [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, **26**(3): 836-841.
- [26] 刘瑞民, 杨志峰, 丁晓雯, 等. 土地利用/覆盖变化对长江上游非点源污染影响研究[J]. *环境科学*, 2006, **27**(12): 2407-2414.
- Liu R M, Yang Z F, Ding X W, *et al.* Effect of land use/cover change on pollution load of non-point source in upper reach of Yangtze river basin[J]. *Environmental Science*, 2006, **27**(12): 2407-2414.
- [27] 马亚丽, 敖天其, 张洪波, 等. 基于输出系数模型澜沧河流域泸县段面源分析[J]. *四川农业大学学报*, 2013, **31**(1): 53-59.
- Ma Y L, Ao T Q, Zhang H B, *et al.* Non-point source analysis of Laixiriver basin in Luxian county based on output coefficient model[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2013, **31**(1): 53-59.
- [28] 任玮, 代超, 郭怀成. 基于改进输出系数模型的云南宝象河流域非点源污染负荷估算[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(8): 2400-2408.
- Ren W, Dai C, Guo H C. Estimation of pollution load from non-point source in Baixianghe watershed based, Yunnan province on improved export coefficient model [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(8): 2400-2408.
- [29] 魏新平, 刘洪雨, 李华, 等. 四川省白鹿河流域非点源氮磷负荷来源及控制对策[J]. *中国农村水利水电*, 2012, (3): 36-38, 43.
- Wei X P, Liu H Y, Li H, *et al.* Research on the source and the control measures of nitrogen and phosphorus of the Bailu river in Sichuan province [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2012, (3): 36-38, 43.
- [30] 杨立梦, 付永胜, 高红涛. 四川省茫溪河流域非点源污染负荷研究[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2014, **28**(11): 57-63.
- Yang L M, Fu Y S, Gao H T. Study on non-point source pollution of Mangxiriver basin in Sichuan province [J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2014, **28**(11): 57-63.
- [31] 郝旭, 张乃明, 史静. 昆明市云龙水库径流区氮磷非点源污染负荷分析[J]. *水土保持通报*, 2013, **33**(6): 274-278, 284.
- Hao X, Zhang N M, Shi J. An analysis of non-point pollution loads in Yunlong reservoir runoff field of Kunming city [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2013, **33**(6): 274-278, 284.
- [32] 马广文, 王业耀, 香宝, 等. 长江上游流域土地利用对面源污染影响及其差异[J]. *农业环境科学学报*, 2012, **31**(4): 791-797.
- Ma G W, Wang Y Y, Xiang B, *et al.* Diversity and effect of diffuse source pollution load caused by land use change in the upper reach of Yangtze river basin, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, **31**(4): 791-797.
- [33] 永胜县地方志编纂委员会. 永胜县统计年鉴(2014) [M]. 云南: 永胜县统计局, 2014.
- [34] 董云仙, 邹锐. 程海湖生态系统研究 [M]. 云南: 科技出版社, 2011.
- [35] 周怀东, 彭文启, 杜霞, 等. 中国地表水水质评价 [J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2004, **2**(4): 255-264.
- Zhou H D, Peng W Q, Du X, *et al.* Assessment of surface water quality in China [J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2004, **2**(4): 255-264.
- [36] 李娜, 韩维峥, 沈梦楠, 等. 基于输出系数模型的水库汇水区农业面源污染负荷估算[J]. *农业工程学报*, 2016, **32**(8): 224-230.
- Li N, Han W Z, Shen M N, *et al.* Load evaluation of non-point source pollutants from reservoir based on export coefficient modeling [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, **32**(8): 224-230.
- [37] 云南省人民代表大会常务委员会. 云南省程海保护条例: 云南省人民代表大会常务委员会公告第 43 号 [EB/OL]. http://www.npc.gov.cn/npc/xinwen/dfrd/yunnan/2007-02/27/content_358521.htm, 2007-02-27.
- [38] Xing G X, Zhu Z L. Regional nitrogen budgets for China and its major watersheds [J]. *Biogeochemistry*, 2002, **57-58**: 405-427.
- [39] 索安宁, 王天明, 王辉, 等. 基于格局-过程理论的非点源污染实证研究: 以黄土丘陵沟壑区水土流失为例 [J]. *环境科学*, 2006, **27**(12): 2415-2420.
- Suo A N, Wang T M, Wang H, *et al.* Empirical study on non-point sources pollution based on landscape pattern & ecological processes theory: a case of soil water loss on the Loess Plateau in China [J]. *Environmental Science*, 2006, **27**(12): 2415-2420.

CONTENTS

Variation of O ₃ Concentration in Different Regions of Beijing from 2006-2015	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, AN Xin-xin, <i>et al.</i> (1)
Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in the North Suburb of Nanjing	XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i> (9)
Seasonal Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM ₁₀ Around Electroplating Plants	ZHAO Zhen-li, ZHAO Wei-tuo, HUANG Ting, <i>et al.</i> (18)
Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM ₁₀ and PM _{2.5} in Yulin City, Guangxi	HUANG Jiong-li, CHEN Zhi-ming, MO Zhao-yu, <i>et al.</i> (27)
Concentrations and Compositions of Different Forms of Nitrogen and Phosphorus in Atmospheric Aerosols in the Qingdao Coastal Region and over the Yellow and Bohai Sea	ZHANG Rui-feng, QI Jian-hua, DING Xue, <i>et al.</i> (38)
Air Quality Subarea Management: A case study of Guangdong Province	YANG Liu-lin, LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, <i>et al.</i> (49)
Remote Sensing Identification of Urban Black-Odor Water Bodies Based on High-Resolution Images; A Case Study in Nanjing	WEN Shuang, WANG Qiao, LI Yun-mei, <i>et al.</i> (57)
Simulation of Nitrate Isotopic ($\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$) by Coupling the Hydrology and Transport Processes Described by the SWAT Model	WANG Kang, RAN Ning, LIN Zhong-bing, <i>et al.</i> (68)
Estimation of and Control Strategies for Pollution Loads from Non-point Sources in the Chenghai Watershed	CHEN Xue-kai, LIU Xiao-bo, PENG Wen-qi, <i>et al.</i> (77)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metals in Drinking Water Sources from the Luhun Reservoir	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i> (89)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Antibiotics in the Water Supply System in Tianjin	ZHANG Xin-bo, SONG Zi, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (99)
Organic Distribution Characteristics and Influence on Drinking Water Quality in the Typical Water Sources for Towns in the Southwest Hilly Area of China	WANG Qiong, LI Nai-wen, LI Lei, <i>et al.</i> (109)
Health Risk Evaluation of Organochlorine and Organophosphorous Pesticides in Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i> (117)
Pollution Status and Risks of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in the Soil of the Yellow River	YAO Hong, LU Shuang, ZHANG Xu, <i>et al.</i> (123)
Effects of Flooding and Drying on the Transformation of Soil Inorganic Phosphorus in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir, China	ZHOU Jian, LI Chun-hui, ZHANG Zhi-yong, <i>et al.</i> (130)
Effect of Phosphate on the Ammonium Removal Performance of Iron-Manganese Co-oxide Film in Surface Water Treatment	ZHUO Rui-shuang, HUANG Ting-lin, ZHANG Rui-feng, <i>et al.</i> (137)
Enhanced Photoelectrocatalytic Oxidation of Cu(CN) ₃ ²⁻ and Synchronous Cathodic Deposition of Cu by Peroxydisulfate	DANG Cong-zhe, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i> (145)
Using HKUST-1 as a Template for Copper Oxides Preparation to Activate Peroxymonosulfate for RhB Degradation	PU Jia-yi, WAN Jin-quan, WANG Yan, <i>et al.</i> (152)
Evaluation of Performance of an Aminated Rosin-based Resin for Adsorption of Norfloxacin from Aqueous Solutions	MA Ya-hong, HUANG Wan-ting, DIAO Kai-sheng, <i>et al.</i> (161)
Arsenic(V) Removal by Granular Adsorbents Made from Backwashing Residuals from Biofilters for Iron and Manganese Removal	ZENG Hui-ping, LÜ Sai-sai, YANG Hang, <i>et al.</i> (170)
Arsenic Adsorption and Its Species on Ferrihydrite and Ferrihydrite Colloid	MA Yu-ling, MA Jie, CHEN Ya-li, <i>et al.</i> (179)
Comparison of Amphoteric-Cationic and Amphoteric-Anionic Modified Magnetic Bentonites: Characterization and Sorption Capacity of Phenol	REN Shuang, MENG Zhao-fu, WANG Teng, <i>et al.</i> (187)
Pollution Characteristics of Parabens in Typical Sewage Wastewater	ZHAO Xue, ZHANG Zi-feng, ZHU Fu-jie, <i>et al.</i> (195)
Influence of Hydraulic Retention Time on the Treatment of Polluted River Water by an Activated Carbon Rotating Biological Contactor	XU Wen-jia, CHENG Xiao-ying, <i>et al.</i> (202)
Removal and Influence of Ciprofloxacin in a Membrane Bioreactor	DAI Qi, LIU Rui, SHU Xiao-ming, <i>et al.</i> (212)
Operation of the AAO Process Under Low Dissolved Oxygen Conditions and Its Simulation	CAO Te-te, WANG Lin, LI Yong-mei, <i>et al.</i> (219)
Inhibitory Effects of Phosphate and Recovery on a Nitrification System	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i> (227)
Effect of Carbon Source on Lab-scale SAD Process in a Wastewater Treatment Plant	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> (232)
Effect of Volume Loading Rate (VLR) on Denitrifying Phosphorus Removal by the ABR-MBR Process	LÜ Liang, YOU Wen, WEI Jia-min, <i>et al.</i> (239)
Combined Process of DNB-F-O ₃ -GAC for Nitrogen and Phosphorus and Metabolite Advanced Removal	ZHONG Li-yan, HAO Rui-xia, WANG Wei-dong, <i>et al.</i> (247)
Influence of Operating Modes for the Alternating Anoxic/Oxic Process on Biological Nitrogen Removal and Extracellular Polymeric Substances of Activated Sludge	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i> (256)
Effects of Nanoscale Zero-valent Iron (nZVI) on Denitrifying Performance of an Upflow Granular Sludge Bed Reactor	ZHOU Feng, WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (263)
Influence on Desulfurization Efficiency and Interactions of Fe/S and pH During H ₂ S in situ Depression of High Solid Anaerobic Digestion	HAN Yun, CAO Yu-qin, ZHUO Yang, <i>et al.</i> (269)
Analysis of Storage Sludge Composition Characteristics and Evolutionary Regularity in the Hunhe River Basin	LIU Tian-tian, CUI Chong-wei, HE Jun-guo, <i>et al.</i> (276)
Enhancement of Anaerobic Methane Production by Removal of Organic-bonding Metals from Sewage Sludge	LU Yi-qing, XU Ying, DONG Bin, <i>et al.</i> (284)
Comparison of Different Leaching Methods for Heavy Metals in Sludge Fly Ash and Comprehensive Toxicity Evaluation	WANG Feng, LI Run-dong, LI Yan-long, <i>et al.</i> (292)
Diurnal Variations of CH ₄ and N ₂ O Fluxes from the Drained Aquaculture Pond in the Minjiang River Estuary During Early Winter	YANG Ping, TAN Li-shan, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i> (300)
Effects of Three Soil Amendments on Greenhouse Gas Emissions From Corn Fields in the Hetao Irrigation District	WU Yan, HONG Mei, LIN Li-long, <i>et al.</i> (310)
Effect of Organic Manure Substitution of Synthetic Nitrogen on Crop Yield and N ₂ O Emission in the Winter Wheat-Summer Maize Rotation System	HOU Miao-miao, LÜ Feng-lian, ZHANG Hong-tao, <i>et al.</i> (321)
Dynamics of Rice Photosynthesized Carbon Input and Its Response to Nitrogen Fertilization at the Jointing Stage: ¹³ C-CO ₂ Pulse-labeling	CHEN Shan, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (331)
Profile Distribution of Soil Organic and Inorganic Carbon Under Different Land Use Types in the Loess Plateau of Northern Shaanxi	LAN Zhi-long, ZHAO Ying, ZHANG Jian-guo, <i>et al.</i> (339)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i> (348)
Effects of Straw and Biochar Return in Soil on Soil Aggregate and Carbon Sequestration	XU Guo-xin, WANG Zi-fang, GAO Ming, <i>et al.</i> (355)
Assessment of the Availability of Soil Copper and Related Influencing Factors at a County Scale	LI Jin-fen, QU Ming-kai, LIU Gang, <i>et al.</i> (363)
Application of the LUR Model in the Prediction of Spatial Distributions of Soil Heavy Metals	ZENG Jing-jing, SHEN Chun-zhu, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (371)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Shenyang North New Area	LI Jia-kang, SONG Xue-ying, WEI Jian-bing, <i>et al.</i> (379)
Passivation of Simulated Pb- and Cd-Contaminated Soil by Applying Combined Treatment of Phosphate, Humic Acid, and Fly Ash	ZHAO Qing-yuan, LI Xiao-ming, YANG Qi, <i>et al.</i> (389)
Distribution and Accumulation of Cadmium in Paddy Soil and Rice Affected by Pollutant Sources Control and Improvement Measures	FENG Wen-li, GUO Zhao-hui, SHI Lei, <i>et al.</i> (399)
Differences in Cd Accumulation in Typical Soils Under the Double Rice System	LI Xin-yang, LONG Jian, WANG Shu-bing, <i>et al.</i> (406)
Distribution Characteristics of Mercury in Reed Leaves from the Jiapiou Gold Mine in the Songhua River Upstream	ZHANG Man-yin, LI Meng-jie, CUI Li-juan, <i>et al.</i> (415)
Effect of Nitrate Amendment on Soil Denitrification Activity and Anthracene Anaerobic Degradation	DAI Jun-shuai, ZUO Xiao-hu, WANG Ming-xia, <i>et al.</i> (422)
Effects of Long-term Fertilization Regimes on Microbial Biomass, Community Structure and Activity in a Paddy Soil	WANG Wei-hua, LIU Yi, TANG Hai-ming, <i>et al.</i> (430)
Analysis of Sulfate-Reducing and Sulfur-Oxidizing Prokaryote Community Structures in Marine Sediments with Different Sequencing Technologies	ZHANG Yu, MI Tie-zhu, ZHEN Yu, <i>et al.</i> (438)
Seasonal and Spatial Variations of Microcystins and Their Relationships with Physicochemical and Biological Factors in Poyang Lake	YUAN Li-juan, LIAO Qie-gen, ZHANG Li, <i>et al.</i> (450)
Distribution of Multidrug-Resistant Bacteria and Antibiotic-Resistant Genes in Livestock Manures	ZHANG Hao, WANG Pan-liang, YANG Qing-xiang, <i>et al.</i> (460)
Influence of Air Pollution Control (APC) Systems and Furnace Type on the Characteristics of APC Residues from Municipal Solid Waste Incinerators	ZHANG Hua, YU Si-yuan, SHAO Li-ming, <i>et al.</i> (467)